

УДК 628.3 (0.75.8)

**В. Л. Еловик**

Белорусский государственный технологический университет

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ, ОБОРУДОВАННЫХ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Рассмотрены исторические предпосылки для создания отвечающей современным требованиям методики расчета энергии, затрачиваемой на транспортирование питьевых и сточных вод. Приведены основы методики подбора насосного оборудования исходя из условий эффективной работы, методики прямого расчета энергии, потребляемой насосными агрегатами во всем диапазоне водопотребления. Данные методики ориентированы в первую очередь на применение машинного расчета и анализа и могут быть использованы в основе соответствующего программного продукта. Применение их в процессе технико-экономического обоснования внедрения регулируемого привода на насосной станции позволяет произвести следующее: проанализировать граничные условия работы насосного агрегата; произвести первичный отбор конкурентных вариантов, наиболее соответствующих требованиям анализируемой системы подачи и распределения воды; гарантированно выбрать варианты насосного оборудования, работающие в допустимых режимах во всем диапазоне расчетных подач; с достаточной точностью определить эффективность и целесообразность внедрения регулируемого привода на насосной станции.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, водопроводно-канализационное хозяйство, насосный агрегат.

**V. L. Elovik**

Belarusian State Technological University

## **CALCULATION AND ANALYSES METHODOLOGY OF THE WORKING CONDITIONS OF PUMPING UNITS, EQUIPPED WITH ADJUSTABLE DRIVE**

The historical background was considered for creation of the up-to-date methodology of energy calculation, which is spent for potable water and wastewater transportation. The selection methodology of pumping units was provided based on the terms of effective work, methodology of forward calculation of the energy, consumed by the pumping units in the whole range of water consumption. In the first place the methodology is designated for usage of machine calculation and analysis and can be used as a base for machine computation and analysis and at the core of a corresponding software product. Usage of the considered methodology in the process of a feasibility study of adjustable drive implementing at the pump station permits the following: to analyze boundary working conditions of the pumping unit; to carry out a primary selection process of competitive variants, which most fully conform with the requirements of the analyzed water supply and distribution system; to select guaranteedly the variants of pumping equipment, working in permissive regimes in the whole range of calculated feeding; to specify with sufficient precision efficiency and feasibility of implementation of the adjustable drive at a pumping station.

**Key words:** energy efficiency, variable-frequency drive, water and sewage utilities, pumping unit.

**Введение.** Необходимость внедрения и использования энергосберегающих технологий в производственных процессах диктуется дефицитом и высокими ценами на энергетические и топливные ресурсы. Одним из основных направлений рационального использования энергии в водопроводно-канализационном хозяйстве (ВКХ) населенных пунктов и промышлен-

ных предприятий является применение насосов, оборудованных регулируемым электроприводом (РЭП) для транспортировки питьевых, технических и сточных вод.

Идея использования частотно-регулируемого насоса для оптимизации энергозатрат появилась еще в первой половине прошлого века. Но сложность конструкции такого привода и

низкая стоимость электроэнергии не способствовали широкому применению данной технологии на практике. Развитие полупроводниковой техники в 70-х гг. прошлого столетия и появление принципиально новых устройств – преобразователей частоты тока (ПЧТ), значительно упростивших создание РЭП, не смогли изменить ситуацию. Сохранившиеся невысокие цены на электроэнергию и высокая стоимость ПЧТ вновь ограничили внедрение данных систем.

В современных условиях дефицита и постоянного возрастающей стоимости энергетических ресурсов использование РЭП насосов стало одним из наиболее эффективных способов экономии электроэнергии в системах подачи и распределения воды (СПРВ) и, как следствие, снижения себестоимости транспортируемой воды. Внедрению РЭП способствуют и современные достижения в микроэлектронике, значительно повысившие эффективность и расширившие возможности ПЧТ.

Широкое распространение РЭП получили на протяжении последних 15–20 лет. Накопленный за это время опыт эксплуатации показал, что, к сожалению, не всегда внедрение регулируемого привода дает ожидаемые экономические результаты. В первую очередь, это связано с отсутствием соответствующей теоретической и методической базы. Стандартные методики разработаны для расчета и анализа режимов работы насосного оборудования при постоянной частоте вращения рабочего колеса центробежного насоса, поскольку ничего иного на момент разработки и не предполагалось. В результате расчет режимов работы насоса с переменной частотой сводится либо к достаточно трудоемкой задаче рассмотрения работы насоса при каждой возможной частоте вращения рабочего колеса, либо к введению поправочных коэффициентов, учитывающих возможность изменения частоты вращения. Во вторую очередь, при помощи стандартных методов, чаще всего графических, затруднительно учитывать неравномерность водопотребления и режимы работы системы подачи и распределения воды в целом. Как правило, детально рассматривается либо насосная станция (система подачи воды), либо водоразборная сеть (система распределения воды). При этом режимы работы всей СПРВ в целом не анализируются. В третью очередь, достаточно сложно, используя стандартные методы расчета, определить затраты энергии на транспортирование воды насосом с РЭП во всем диапазоне подач за расчетный период и, как следствие, эффективность и экономическую целесообразность внедрения такого оборудования.

В результате всего вышеперечисленного фактические режимы работы системы могут

значительно отличаться от расчетных режимов. И по этой причине, вопреки ожиданиям, эффект от внедрения РЭП на насосной станции может не только приблизиться к нулю, но и принять отрицательные значения.

**Основная часть.** Вопросам расчета и анализа режимов работы СПРВ посвящены труды многих исследователей: Пфлейдерер К. (Pfleiderer K.), Прегер Е. А., Мошин Л. Ф., Ильин В. Г., Абрамов Н. Н., Старинский В. П., Лезнов Б. С., Карлсон Р. (Carlson R.), Усачев А. П. В работах этих ученых приводятся различные подходы, методы анализа, формы математического описания режимов работы СПРВ. Однако в большинстве из них вопросы применения насосов с РЭП не рассматриваются. Кроме того, применение данных методов для ТЭО внедрения РЭП затруднено по нескольким причинам:

- узконаправленность методик – детальному рассмотрению подлежат отдельные компоненты СПРВ, наличие прочих компонентов учитывается по осредненным показателям или поправочным коэффициентам;

- низкая точность методик – погрешность расчетов по ряду методик составляет 15–20%, что не может удовлетворять требованиям современного инженерного расчета;

- упрощения и допущения в самих режимах работы насосного оборудования (например, работа насоса не по давлению в диктующей точке, а по давлению в напорном коллекторе насосной станции), упрощающих анализ и расчеты, но, в то же время, снижающих потенциал внедрения РЭП;

- трудоемкость расчетов – анализ режимов работы насоса с РЭП по ряду методик сопряжен с большим количеством трудоемких графических построений и вычислений.

Исправить ситуацию может использование компьютерных технологий в процессах расчета и анализа СПРВ, так как появляется возможность оперировать любым объемом данных и рассматривать любое количество вариантов при низких затратах труда и времени. Но стандартные графические методики не позволяют в полной мере применять потенциал ЭВМ, оставляя ему роль графопостроителя.

Ввиду этого появилась необходимость, используя созданную теоретическую базу и возможности современной вычислительной техники для автоматизации расчетов, разработать новые методы расчета энергопотребления, учитывающие неравномерность водопотребления и режимы работы всей СПРВ в целом, за любой расчетный период.

Как требуют нормативные документы и показывает практика, внедрение РЭП должно сопровождаться соответствующим технико-

экономическим обоснованием (ТЭО). При этом рекомендуется рассматривать несколько конкурентно способных вариантов, выбирая в итоге наиболее подходящий по основным критериям. Чем больше вариантов будет рассмотрено, тем больше вероятность выбора наиболее оптимального из них.

Значительное количество рассматриваемых вариантов сопряжено с большим объемом трудоемких расчетных работ, выполнить которые не представляется возможным без привлечения мощностей современной вычислительной техники. Данная методика ориентирована на применение ЭВМ в процессах анализа и расчета режимов работы насосного оборудования.

Расчет режимов работы как самих насосов, так с насосной станции (НС) в целом может быть произведен при наличии следующих исходных данных:

- расход воды, который нужно подать потребителю (л/с; м<sup>3</sup>/ч);
- напор, необходимый для преодоления всех сопротивлений на пути потока от насосной станции до потребителя и обеспечения требуемого давления в водоразборной сети потребителя (м вод. ст.; атм);
- значения максимального, среднего и минимального потребления воды потребителем (определяется по нормативной литературе).

Кроме того, для существующих объектов желательна наличие фактического графика неравномерности водопотребления.

Расчет режимов работы насосного оборудования с РЭП можно подразделить на четыре основных этапа:

1. Определение характеристики  $Q-H_{тр}$  системы распределения воды (СРВ).

2. Подбор насосного оборудования исходя из критериев стабильной и энергоэффективной работы во всем диапазоне водопотребления  $Q_{min}-Q_{max}$ .

3. Определение зависимости мгновенной потребляемой мощности  $N_i$  от производительности насосной станции  $Q_i$  во всем диапазоне водопотребления  $Q_{min}-Q_{max}$ .

4. Расчет затрат электроэнергии  $W_T$  насосной станцией на транспортирование воды за расчетный период  $T$ .

Каждый из этапов, по сути, является самостоятельной инженерной задачей.

**Определение характеристики системы распределения воды.** Основными расчетными параметрами системы распределения воды являются:

- характерные значения водопотребления:  $Q_{min}$ ,  $Q_{ср}$ ,  $Q_{max}$ , определяемые в соответствии с требованиями нормативов [1, п. 6];

- расчетное значение водопотребления  $Q_p$ :

$$Q_p = Q_{max};$$

- требуемый напор у насосной станции при  $Q_p-H_p$ :

$$H_p = H_{г} + \Delta h_p, \quad (1)$$

где  $H_{г}$  – геометрическая высота подъема воды, определяемая как разность абсолютных отметок требуемого пьезометра у потребителя (в диктующей точке) и минимального уровня воды в источнике (резервуаре чистой воды);  $\Delta h_p$  – суммарные потери напора в системе распределения воды при транспортировании расчетного расхода  $Q_p$  (рис. 1), определяются в результате гидравлического расчета водопроводной сети. Суммарные потери напора возможно выразить выражением (2):

$$\Delta h_p = S \cdot Q_p^2, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент гидравлического сопротивления водоразборной сети, принимается постоянным во всем диапазоне водопотребления для данной СРВ:

$$S = (\Delta h_p) / (Q_p^2). \quad (3)$$

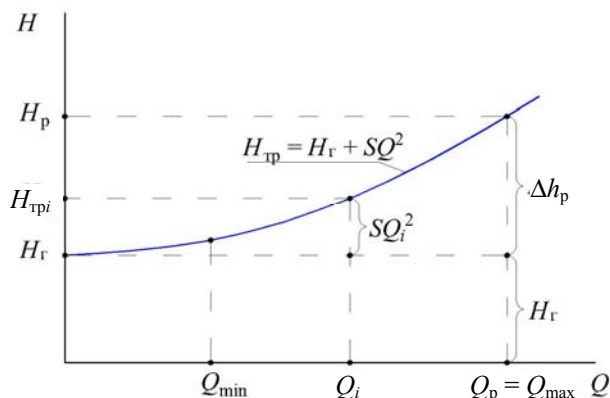


Рис. 1. Эквивалентная характеристика СРВ

Ввиду этого зависимость требуемого напора  $H_{тр}$  у насосной станции от величины водопотребления  $Q$  с достаточной степенью точности определяется эквивалентной характеристикой [2]:

$$H_{тр} = H_{г} + S \cdot Q^2. \quad (4)$$

Используя зависимость (4), легко определить требуемый напор у насосной станции при любом значении водопотребления. Данная зависимость определяет режимы работы всей системы подачи и распределения воды (СПРВ). Для достижения оптимальных показателей энергопотребления и эффективности работы нужно стремиться к полному соответствию режимов СРВ и НС.

Здесь следует отметить, что **фактическое положение** рабочих точек  $Q_{тр}-H_{тр}$  в диапазоне  $Q_{min}-Q_{max}$  не обязательно должно лежать на кривой (4) [2]. И чем сложнее СРВ, тем больше будет данное отклонение, особенно в зоне среднестатистического водопотребления (рис. 2). Таким образом, выражение (4) отображает усредненную эквивалентную характеристику СРВ  $Q-H$ .

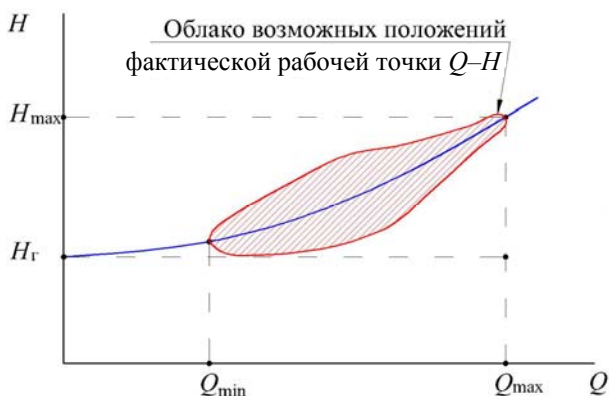


Рис. 2. Облако фактических положений рабочей точки  $Q-H$

**Подбор насосного оборудования исходя из критериев стабильной и эффективной работы во всем диапазоне водопотребления.** Как правило, подбор насосного оборудования производится путем совмещения эквивалентной характеристики СРВ  $Q-H_{тр}$  и напорной характеристики насоса  $Q-H_n$ . При этом необходимо руководствоваться приведенными ниже положениями:

а) насосная станция должна обеспечивать подачу воды  $Q_p$  соответствующую максимальному расчетному водопотреблению:  $Q_p = Q_{max}$ , с расчетным напором  $H_p$  [1, п. 10.2] при номинальной частоте вращения рабочего колеса (рис. 3);

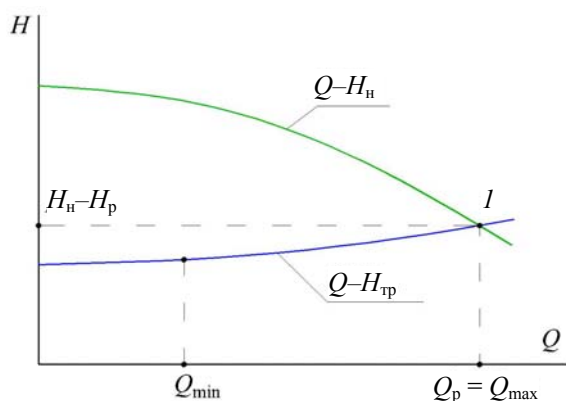


Рис. 3. Совместная работа насоса и СРВ

б) рабочая точка насосного агрегата (одиночного или работающего в группе) во всем

расчетном диапазоне водопотребления от  $Q_{min}$  до  $Q_{max}$  должна находиться в пределах рабочей зоны, установленной заводом-изготовителем;

в) выбор насоса должен производиться таким образом, чтобы как можно дольше он работал с максимальным кпд (оптимальной подачей  $Q_{opt}$ ). В этой режимной точке насос должен работать с максимально возможным кпд при любой частоте вращения рабочего колеса, но при этом расчетная режимная точка  $Q_{max}$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса не должна находиться за пределами рабочей зоны  $Q_b$  (рис. 4):

$$Q_{opt} \rightarrow Q_{рт}; \quad (5)$$

$$Q_{max} < Q_b. \quad (6)$$

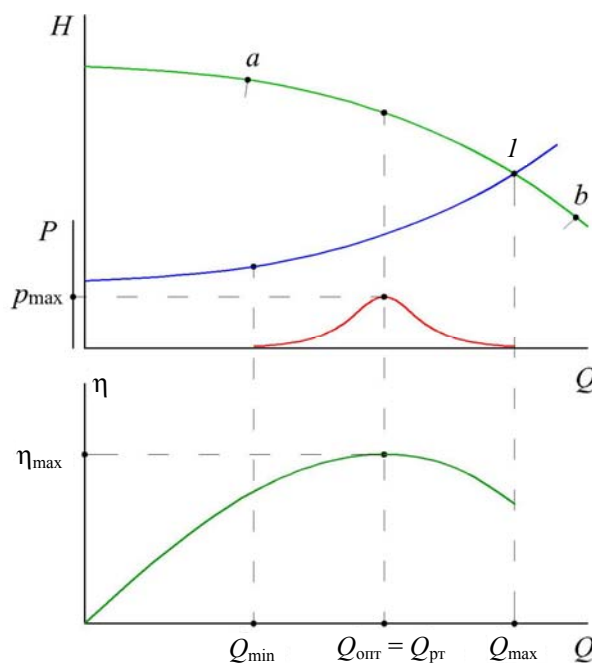


Рис. 4. Критерий эффективной работы нерегулируемого насоса:

$P$  – вероятность возникновения водопотребления

Условия (5) и (6) справедливы для насоса, работающего с постоянной частотой вращения рабочего колеса (нерегулируемый насос). В случае, если насос будет работать с переменной частотой вращения рабочего колеса (регулируемый насос), то условие (5) примет следующий вид:

$$Q_{opt} \cdot (n_{рт} / n_n) \rightarrow Q_{рт}, \quad (7)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения рабочего колеса;  $n_{рт}$  – частота вращения рабочего колеса при средней расчетной подаче  $Q_{рт}$ . Условие (6) при этом остается неизменно (рис. 5). Соблюдая перечисленные условия, становится возможным при выборе насосного оборудования

выбрать такой насос, который максимально продолжительное время работал бы в режимах, близких к оптимальному. Но при этом не стоит забывать, что условия (5) и (7) носят приблизительный характер и предназначены, скорее, не для выбора самого подходящего варианта, а для отсеивания заведомо неподходящих. Поэтому варианты, конкурирующие по условиям (5) или (7), должны подвергаться более подробному анализу и технико-экономическому расчету. При этом особое внимание следует обратить на соблюдение условия (6).

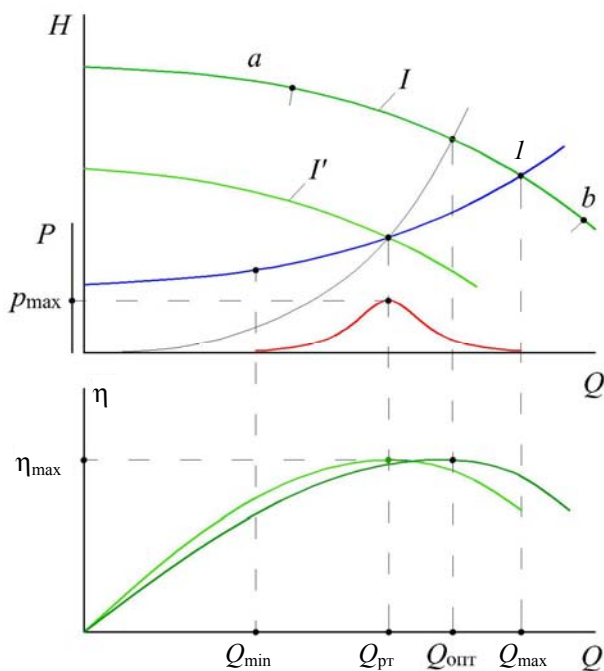


Рис. 5. Критерий эффективной работы регулируемого насоса:

$I$  – характеристика насоса при номинальной частоте;  
 $I'$  – характеристика насоса при частоте  $n'$ , соответствующей наиболее вероятной подаче  $Q_{opt}$

Одним из обязательных требований стабильной и эффективной работы насосного оборудования является его работа в пределах рабочих зон / областей во всем диапазоне водопотребления от  $Q_{min}$  до  $Q_{max}$ . Работа насоса вне этих пределов приводит к снижению надежности работы всей СПРВ в результате:

- работы насоса в неустойчивых режимах;
- кавитации;
- перегрузки электродвигателя насоса.

Кроме того, работа насосов за пределами рабочей зоны ведет за собой нерациональный расход энергии ввиду низких КПД.

При подборе нерегулируемых насосов не возникает проблем с определением границ опасных зон – все необходимые для этого ха-

рактеристики приведены в паспорте насоса. Сложнее задача обстоит при выборе регулируемого насоса, так как паспортные характеристики не позволяют проанализировать работу насосного агрегата с переменной частотой. В этом случае для предотвращения выхода насоса за пределы установленной заводом-изготовителем рабочей зоны необходимо произвести проверку вариантов насосного оборудования, удовлетворяющих условиям настоящей методики, на соответствие нижеприведенным граничным условиям.

Работа насоса в неустойчивых режимах возможна:

- а) если он имеет восходящий участок напорной характеристики;
- б) возможны режимы работы насоса на восходящем участке характеристики, что проверяется нижеприведенными условиями.

При рассмотрении одиночно работающего насоса (рис. 6) выполняется условие (8):

$$H_r < H_0 \left( \frac{n_p}{n_n} \right)^2 ; n_p > n_k, \quad (8)$$

что гарантирует работу насоса только в стабильных режимах.

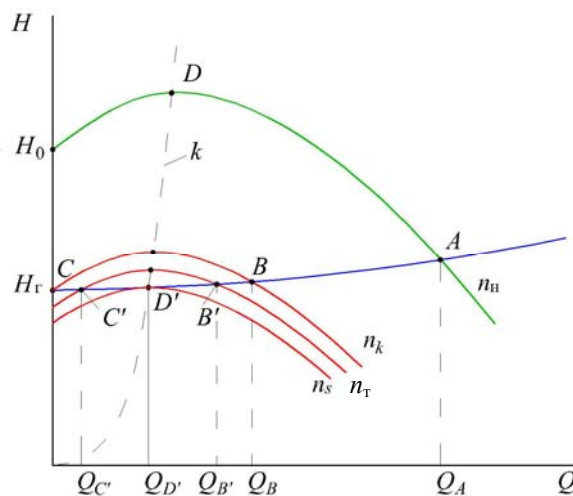


Рис. 6. Границы неустойчивых режимов работы насосного оборудования

Стабильная параллельная работа однотипных насосов, один из которых регулируемый, невозможна. В этом случае необходимо применять разнотипные агрегаты. Для гарантированной работы насосов в стабильных режимах в пределах рабочей области нужно определить достаточную степень разнотипности.

Степень разнотипности определяется следующим отношением:

$$\tau = \frac{Q_B - Q'_B}{Q_z}, \quad (9)$$

где  $Q_B$  – номинальная подача регулируемого насоса работающего на систему распределения воды;  $Q_B'$  – подача нерегулируемого насоса при напоре  $H_B$ ;  $Q_z$  – подача насоса на границе рабочей области при напоре  $H_B$  (см. рис. 7). При этом можно отметить следующее:

- если  $\tau \geq 1$ , то работа регулируемого насоса гарантирована в пределах рабочей области;
- если  $\tau < 1$ , то после момента включения в работу нерегулируемого насоса регулируемый насос некоторое время будет работать за пределами рабочей зоны;
- соблюдение условия  $\tau \geq 1$ , автоматически обеспечит выполнение условия (8), так как для выполнения последнего требуется меньшая степень разнотипности;
- степень разнотипности – величина относительная и зависит не только от типа напорных характеристик рассматриваемых насосов, но и от эквивалентной характеристики системы распределения воды.

Руководствуясь при подборе насосов приведенными условиями, возможно выделить ряд конкурентно способных вариантов оборудования для рассматриваемой СРВ. Конечный выбор варианта следует осуществлять на основании технико-экономического обоснования (ТЭО) в результате подробного анализа энергопотребления насосного оборудования.

**Расчет потребляемой мощности  $N_i$  насосной станцией во всем диапазоне водопотребления  $Q_{\min}-Q_{\max}$ .** Для расчета потребляемой мощности диапазон водопотребления следует разбить на рабочие участки, разделенные переходными режимами в соответствии с количеством работающего оборудования. Расчет рассмотрим на примере насосной станции, оборудованной  $n$  насосными агрегатами. При этом участки распределяются следующим образом:

1-й участок ( $Q_{\min}-Q_1$ ) – участок, на котором работает один насос (регулируемый);

2-й участок ( $Q_1-Q_2$ ) – участок, на котором параллельно работают два насоса, как минимум один из которых регулируемый;

...

$n$ -ный участок ( $Q_{n-1}-Q_{\max}$ ) – участок, на котором параллельно работают  $n$  насосов.

$Q_1, Q_2$  и  $Q_{n-1}$  – номинальная производительность 1-го, 2-го и  $n-1$  параллельно работающих насосов на систему распределения воды (переходные режимы работы);  $Q_{\max} = Q_p$  – номинальная производительность всей насосной станции.

**1-й рабочий участок.** В диапазоне ( $Q_{\min}-Q_1$ ) работает один частотно регулируемый насос. Режимы работы насосного оборудования определяются в соответствии с эквивалентной характеристикой (4).

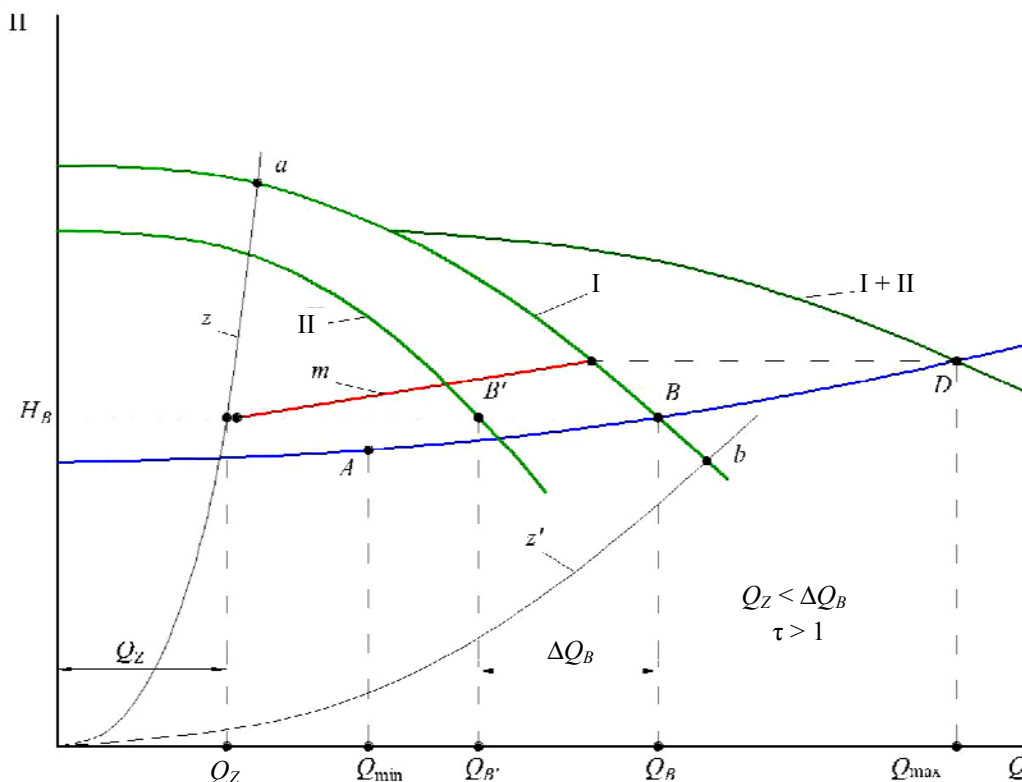


Рис. 7. Определение степени разнотипности насосов:  
I – частотно-регулируемый насос; II – нерегулируемый насос;  
 $m$  – режимная характеристика

Переходный режим  $Q_1-H_1$  определяется путем совместного решения уравнения (1) и уравнения номинальной характеристики регулируемого насоса (10) при номинальной частоте вращения рабочего колеса ( $n = n_n$ ):

$$H = a_0 \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 + a_1 \left( \frac{n}{n_n} \right) Q + a_2 \cdot Q^2, \quad (10)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации паспортной номинальной характеристики насоса  $Q-H$ ;  $n$  – частота вращения рабочего колеса насоса при подаче расхода  $Q$  в СРВ;  $n_n$  – номинальная частота вращения рабочего колеса насоса. При номинальном режиме работы

$$n = n_n \frac{\sqrt{(a_1 \cdot Q)^2 + 4a_0(H_{тр} - a_2 \cdot Q^2)} - a_1 \cdot Q}{2a_0}. \quad (11)$$

Потребляемую насосом мощность при любой подаче  $Q$  на рабочем участке 1 можно определить исходя из выражения (12):

$$N_1 = N_{пер} = b_0 \left( \frac{n}{n_n} \right)^3 + b_1 \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 \cdot Q + b_2 \left( \frac{n}{n_n} \right) \cdot Q^2. \quad (12)$$

где  $b_0, b_1, b_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации паспортной номинальной характеристики насоса  $Q-N$ .

*2-й рабочий участок.* Рассмотрим два возможных режима работы.

Работает регулируемый насос параллельно с нерегулируемым. Требуемый напор  $H_{тр}$  определяется эквивалентной характеристикой системы (4) при водопотреблении  $Q$ , тогда подачу нерегулируемого насоса  $Q'$  можно определить исходя из выражения (13):

$$Q' = - \frac{\sqrt{a_1'^2 - 4a_2'(a_0' - H_{тр})} + a_1'}{2a_2'}, \quad (13)$$

где  $a_0', a_1', a_2'$  – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации паспортной характеристики нерегулируемого насоса. Производительность регулируемого  $Q_{пер}$  насоса в этом случае можно будет определить так:

$$Q_{пер} = Q - Q'. \quad (14)$$

Потребляемую мощность нерегулируемым насосом определяем из выражения

$$N' = b_0' + b_1' \cdot Q' + b_2' \cdot Q'^2, \quad (15)$$

где  $b_0', b_1', b_2'$  – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации паспортной характеристики  $Q-N$  нерегулируемого насоса. Потребляемую мощность частотно-регу-

лируемым насосом  $N_{пер}$  при подаче  $Q_{пер}$  и напоре  $H_{тр}$  определяем аналогично, как и на 1-м рабочем участке, используя выражение (12). Суммарная потребляемая мощность  $N_2$  определяется

$$N_2 = N_{пер} + N', \quad (16)$$

Работают параллельно два однотипных регулируемых насоса с синхронной частотой. Поскольку насосы однотипные и работают синхронно, то производительность каждого из насосов  $Q_{пер}$  при водопотреблении  $Q$  можно определить как

$$Q_{пер} = Q / 2. \quad (17)$$

Частота вращения рабочего колеса каждого из насосов определится из выражения

$$n = n_n \frac{\sqrt{(a_1 \cdot Q_{пер})^2 + 4a_0(H_{тр} - a_2 \cdot Q_{пер}^2)} - a_1 \cdot Q_{пер}}{2a_0}. \quad (18)$$

Потребляемая мощность  $N_2$ :

$$N_2 = 2N_{пер} = 2 \cdot \left[ b_0 \left( \frac{n}{n_n} \right)^3 + b_1 \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 \cdot Q_{пер} + b_2 \left( \frac{n}{n_n} \right) \cdot Q_{пер}^2 \right]. \quad (19)$$

*n-ный рабочий участок.* Так же, как и на предыдущем участке, рассмотрим два возможных варианта.

Работает регулируемый насос параллельно с  $n-1$  однотипными нерегулируемыми насосами. Требуемый напор  $H_{тр}$  определяется эквивалентной характеристикой системы (4) при водопотреблении  $Q$ , тогда подачу нерегулируемого насоса  $Q'$  можно определить исходя из выражения (1). Производительность регулируемого  $Q_p$  насоса в этом случае можно будет определить так:

$$Q_p = Q - (n-1)Q'. \quad (20)$$

Потребляемую мощность нерегулируемыми насосами определяем из выражения

$$N' = (n-1)[b_0' + b_1' \cdot Q' + b_2' \cdot Q'^2], \quad (21)$$

где  $b_0', b_1', b_2'$  – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации паспортной характеристики насоса  $Q-N$  нерегулируемого насоса (как правила предоставляется заводом изготовителем). Потребляемую мощность частотно-регулируемым насосом  $N_{пер}$  при подаче  $Q_{пер}$  и напоре  $H_{тр}$  определяем аналогично, как и на 1-м рабочем участке по выражению (12). Суммарная потребляемая мощность  $N_2$  определится следующим образом:

$$N_n = N_{\text{рег}} + N'. \quad (22)$$

Работают два однотипных регулируемых насоса с синхронной частотой параллельно с  $n-2$  нерегулируемыми однотипными насосами. Требуемый напор  $H_{\text{тр}}$  определяется эквивалентной характеристикой системы (4) при водопотреблении  $Q$ , тогда подачу нерегулируемого насоса  $Q'$  можно определить исходя из выражения (13). Производительность регулируемого  $Q_{\text{рег}}$  насоса в этом случае можно будет определить как:

$$Q_{\text{рег}} = (Q - m \cdot Q') / 2. \quad (23)$$

Потребляемую мощность нерегулируемыми насосами определяем из выражения:

$$N' = (n - 2)[b'_0 + b'_1 \cdot Q' + b'_2 \cdot Q'^2], \quad (24)$$

а потребляемую мощность регулируемыми насосами – из выражения (19). Суммарную потребляемую мощность определяем по выражению (22).

Таким образом, при любом количестве работающего оборудования можно рассчитать потребляемую мощность в зависимости от водопотребления.

Следует отметить, что установка на насосной станции более двух регулируемых насосных агрегатов экономически не оправдана. Это вызвано тем, что, как показывает практика и расчеты, нет необходимости в одновременном регулировании более двух насосных агрегатов для обеспечения любых требуемых технологических режимов.

**Расчет объема энергии  $W_T$ , потребленной насосной станцией за расчетный период  $T$ .** Объем энергии, потребленной насосной станцией за расчетный период, в первую очередь зависит от неравномерности водопотребления и характера ее распределения в течение расчет-

ного периода. Отбор воды из СРВ носит вероятностный характер и его можно охарактеризовать обеспеченностью водопотребления  $t$  за расчетный период  $T$ , выраженный в часах:

$$t = \frac{T}{100} \left[ a + b \cdot M + c \cdot M^2 + d \cdot M^3 + e \cdot M^4 + f \cdot M^5 + g \cdot M^6 \right], \quad (25)$$

где  $M$  – модульный коэффициент:

$$M = Q / Q_{\text{ср}}; \quad (26)$$

$a, b, c, d, e, f$  и  $g$  – эмпирические коэффициенты обеспеченности, определяемые по таблице в зависимости от коэффициента вариации водопотребления  $C_v$  и коэффициента асимметрии  $C_s$ .

При этом коэффициент вариации  $C_v$  принято считать равным коэффициенту асимметрии  $C_s$  [3]:

$$C_v = C_s = 0,45 + 0,15 \cdot K_{\text{max}} \cdot K_{\text{min}} + 0,55 \cdot \left( \frac{a_{\text{max}}}{a_{\text{min}}} - 1 \right) - 0,075 \sqrt{|\ln N|} \cdot \ln N, \quad (27)$$

где  $K_{\text{min}}$  и  $K_{\text{max}}$  – коэффициенты суточной неравномерности [78];  $a_{\text{min}}$  и  $a_{\text{max}}$  – коэффициенты, учитывающие степень благоустройства жилой застройки населенного пункта, режим работы его предприятий и другие местные условия [4];  $N$  – число жителей населенного пункта, тыс. чел. (таблица).

Поскольку потребляемая мощность напрямую зависит от значения водопотребления, то вполне логично предположить, что потребляемая мощность насосными агрегатами имеет ту же обеспеченность, что и соответствующее ей водопотребление, т. е. если водопотребление  $Q_i$  имеет обеспеченность  $t_i$ , а потребляемая мощность при  $Q_i$  равняется  $N_i$ , то потребляемая мощность  $N_i$  имеет так же обеспеченность  $t_i$  (рис. 8).

#### Коэффициенты обеспеченности

$C_v = C_s$	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$
0,1	159779,3072018	-1017835,60	2681837,30	-3738273,50	2905686,40	-1193799,10	202654,01679890
0,2	2389,77275780	-16038,0194591	43652,70718610	-61274,8578239	46508,78161680	-18150,4338668	2960,42906280
0,3	176,71658580	-1249,1624820	3464,5282440	-4696,67048270	3177,31268050	-1066,9681590	242,22263980
0,4	20,87812270	-155,05738990	424,57472010	-491,61683520	186,32945850	-41,13607690	103,45405360
0,5	3,75284050	-28,73709920	72,64094840	-46,17721480	-49,85697160	-5,45854640	100,40772450
0,6	0,19518810	-1,5138240	-0,55637460	26,08321440	-49,84637510	-29,31060320	100,66031770
0,7	0,23593630	-2,46384250	8,54138560	-9,97864340	9,97711330	-61,59868070	99,93531890
0,8	0,74167160	-7,95282950	33,01121760	-66,9305310	78,2074610	-91,92450410	98,27241470

*Примечание.* Округлять приведенные коэффициенты не рекомендуется, так как значительно снижается точность построения.



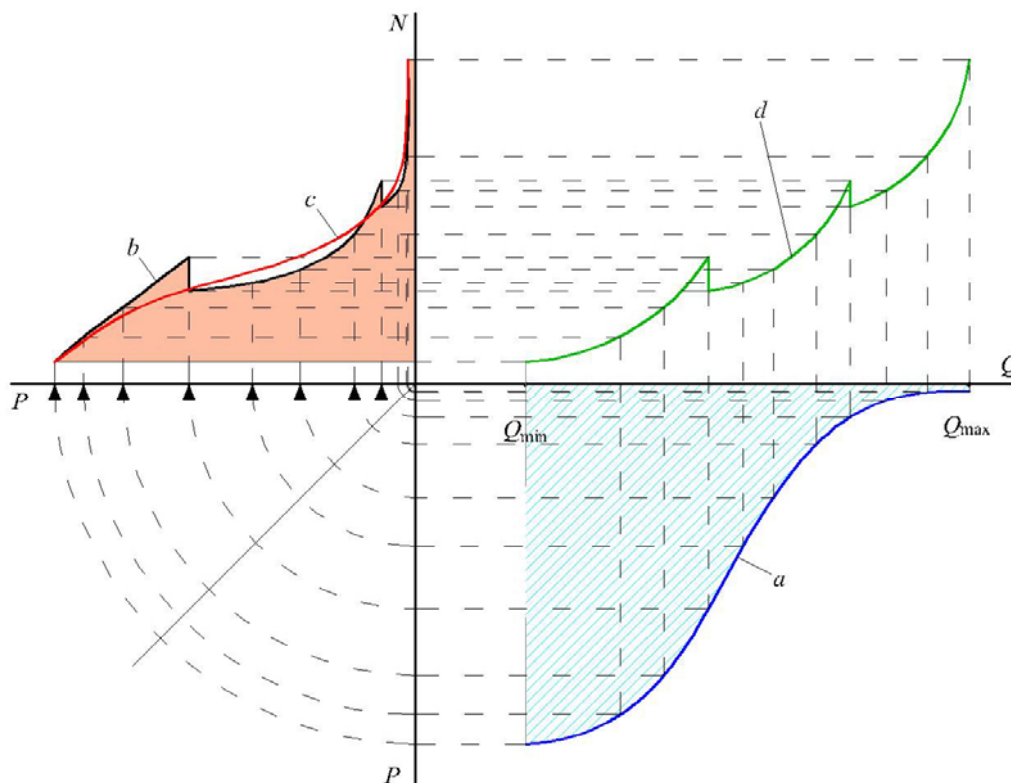


Рис. 8. Определение обеспеченности энергопотребления:  
*a* – обеспеченность водопотребления;  
*b* – фактическая обеспеченность энергопотребления по участкам;  
*c* – аппроксимирующая кривая обеспеченности энергопотребления;  
*d* – зависимость потребляемой мощности от водопотребления

**Заключение.** Таким образом, можно построить ряд соответствующих значений  $N-t$ , аппроксимируя который можно получить зависимость обеспеченности потребляемой мощности насосными агрегатами во всем диапазоне водопотребления. В качестве аппроксимирующей зависимости для получения достаточной степени точности рекомендуется принимать полином 6-й степени:

$$t = a' + b' \cdot N + c' \cdot N^2 + d' \cdot N^3 + e' \cdot N^4 + f' \cdot N^5 + g' \cdot N^6, \quad (28)$$

где  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $d'$ ,  $e'$ ,  $f'$  и  $g'$  – эмпирические коэффициенты обеспеченности энергопотребления.

Интегрируя зависимость (28) в пределах от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$ , получаем объем энергопотребления  $W_T$  за расчетный период:

$$W_T = \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} t(N) \cdot d \cdot N \quad (29)$$

Величина  $W_T$  является определяющей при окончательном выборе варианта, так как является основной частью эксплуатационных затрат.

### Литература

1. Технический кодекс установившейся практики. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). 16 марта 2018. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2018. 75 с.
2. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
3. Старинский В. П. Технологические гидравлические и технико-экономические расчеты в водоснабжении: учеб. пособие. Минск: Выш. шк., 1985. 200 с.

### References

1. ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). Technical code of the established practice. Water supply. External networks and structures. Building regulations. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., 2018. 75 p. (In Russian).

2. Leznov B. S. *Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy efficiency and adjustable drive in pumping and blowing plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 360 p.

3. Starinsky V. P. *Tekhnologicheskiye gidravlicheskiye i tekhniko-ekonomicheskiye raschety v vodosnabzhenii* [Technological hydraulic and feasibility study in water supply: study guide for universities with a specialization in water supply and sewerage]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 1985. 200 p.

#### **Информация об авторе**

**Еловик Валерий Леонидович** – аспирант кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

#### **Information about the author**

**Elovik Valeriy Leonidovich** – PhD student, the Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republik of Belarus). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

*Поступила 02.05.2019*